

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19120051301883

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

氧化镍-磷钼杂多酸铯盐纳米复合物催化剂
的合成及其丙烷和异丁烷氧化脱氢
催化性能研究

Synthesis of NiO-CsPOM Nanocomposite Catalysts and the
Catalytic Performance on the Oxidative Dehydrogenation of
Propane and Isobutane

曹传景

指导教师姓名: 张庆红 副教授

万惠霖 教授

专 业 名 称: 物 理 化 学

论文提交日期: 2008 年 7 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 7 月

A thesis submitted to Xiamen University for M. S. Degree

**Synthesis of NiO-CsPOM Nanocomposite Catalysts and the
Catalytic Performance on the Oxidative Dehydrogenation of
Propane and Isobutane**

By Chuanjing Cao

Supervisor: Qinghong Zhang *Asso. Prof.*

Huilin Wan *Prof.*

State Key Laboratory of Physical Chemistry of Solid Surfaces

College of Chemistry and Chemical Engineering

Xiamen University

July, 2008

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要	I
----	---

Abstract	II
----------	----

第一章 绪 论

1.1 低碳烷烃选择氧化反应概况	1
1.2 丙烷与异丁烷氧化脱氢制丙烯与异丁烯的意义	1
1.3 丙烷和异丁烷脱氢与氧化脱氢制丙烯和异丁烯的反应途径对比	2
1.3.1 丙烷脱氢与氧化脱氢制丙烯的反应途径对比	2
1.3.2 异丁烷脱氢与氧化脱氢制异丁烯的反应途径对比	4
1.4 丙烷和异丁烷氧化脱氢制丙烯和异丁烯的催化剂简介	5
1.4.1 丙烷氧化脱氢制丙烯催化剂简介	5
(1) 低温纳米氧化物催化剂	5
(2) 杂多酸盐类催化剂	5
(3) 钒基催化剂	6
(4) 钼基催化剂	6
(5) 镍基催化剂	7
(6) 其它类型催化剂	7
1.4.2 异丁烷氧化脱氢制异丁烯催化剂简介	7
1.5 丙烷和异丁烷氧化脱氢制丙烯和异丁烯的反应机理	8
1.6 杂多化合物简介	10
1.6.1 杂多化合物的晶体结构	12
1.6.2 杂多化合物的热稳定性	13
1.7 论文的构思和目的	13
1.8 论文的组成和概要	14
参考文献	15

第二章 实验部分

2.1 原料与试剂	22
2.2 催化剂的制备	23
2.2.1 Keggin型 $\text{H}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$ 杂多酸的合成	23
2.2.2 Keggin型 $\text{H}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$ 杂多酸铯盐的合成	23
2.2.3 氧化镍与磷钼杂多酸盐复合物催化剂的合成	24
(1) 柠檬酸配位法	24
(2) 机械研磨法	24
2.3 催化剂反应性能的评价和计算方法	25
2.3.1 催化剂的性能评价	25
2.3.2 计算方法	25
(1) 丙烷的转化率和产物的选择性计算方法	25
(2) 异丁烷的转化率和产物的选择性计算方法	26
2.4 催化剂表征	29
2.4.1 X 射线粉末衍射 (XRD)	29
2.4.2 低温 N_2 物理吸附	29
2.4.3 扫描电镜实验 (SEM)	29
2.4.4 电子能谱测试 (EDS)	29
2.4.5 高分辨透射电镜 (TEM)	29
2.4.6 原位吸附红外光谱	30
2.4.7 程序升温脱附 (NH_3 -TPD and O_2 -TPD)	31
2.4.8 X-光电子能谱实验 (XPS)	31
2.4.9 程序升温还原 (H_2 -TPR)	31
2.4.10 激光 Raman 光谱	32
参考文献	32

第三章 NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂在丙烷及异丁烷氧化脱氢反应中的催化性能

3.1 引言	33
3.2 结果与讨论	33
3.2.1 丙烷氧化脱氢反应催化剂探索结果	33
(1) 磷钼杂多酸盐系列催化剂的催化性能	34
I 铯含量对磷钼杂多酸铯盐催化剂催化性能的影响	34
II 引入少量过渡金属阳离子对催化剂催化性能的影响	35
(2) 金属氧化物与杂多酸铯盐纳米复合物催化剂的催化性能	35
I 不同过渡金属氧化物对 Mo-CsPOM 系列催化剂性能的影响	35
II NiO 含量对 NiO-CsPOM 纳米复合物催化剂性能的影响	37
III Cs 含量对 80%NiO-Cs _n POM 纳米复合物催化剂性能的影响	38
(3) 不同碱金属或碱土金属盐对 80%NiO-APOM 催化剂性能的影响	39
(4) 催化剂制备方法与不同钼源制备的催化剂催化性能的关联	41
I 制备方法与催化活性的关联	41
II 不同钼源制备的催化剂催化性能的关联	43
(5) 反应条件对催化剂反应性能的影响	45
I 反应温度对 80%NiO-CsPOM 催化活性的影响	45
II 丙烷分压对 80%NiO-CsPOM 催化活性的影响	45
III 氧气分压对 80%NiO-CsPOM 催化活性的影响	46
IV 优化反应条件后 80%NiO-KPOM 催化剂的催化性能	47
(6) 催化剂寿命测试	48
3.2.2 异丁烷氧化脱氢反应催化剂探索结果	49
(1) NiO 含量对 NiO-CsPOM 催化剂异丁烷氧化脱氢性能的影响	49
(2) 反应条件对 70%NiO-CsPOM 催化剂反应性能的影响	50
I 反应温度的影响	50
II 氧分压的影响	51
(3) 70%NiO-CsPOM 催化剂寿命测试	51
(4) NiO 含量对 NiO-KPOM 催化剂异丁烷氧化脱氢性能的影响	52
3.3 本章小结	53
参考文献	54

第四章 NiO-CsPOM 纳米复合物催化剂的表征及构效关联

4.1 引言	56
4.2 结果与讨论	56
4.2.1 X 射线粉末衍射	56
(1) NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂 XRD 对比	58
(2) NiO-CsPOM 纳米复合物催化剂反应前后的 XRD 谱图对比	59
4.2.2 低温N ₂ 物理吸附	60
4.2.3 扫描电镜表征(SEM)	61
4.2.4 NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂电子能谱表征(EDS)	64
4.2.5 高倍透射电镜(TEM)	66
4.2.6 NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂氨吸附红外光谱表征	76
4.2.7 NiO-CsPOM纳米复合物系列催化剂NH ₃ -TPD表征	82
4.2.8 NiO-CsPOM纳米复合物系列催化剂O ₂ -TPD研究	86
4.2.9 NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂表面晶相的 XPS 研究	90
4.2.10 NiO-CsPOM纳米复合物系列催化剂H ₂ -TPR表征	97
4.2.11 NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂 Raman 表征	98
4.8 本章小结	99
参考文献	100

第五章 结论

硕士在读期间发表论文目录

致谢

CONTENTS

Abstract in Chinese	I
Abstract	II
 Chapter 1 General Introduction	
1.1 Selective Oxidation of Light Alkane Overview	1
1.2 Significance of the Oxidative Dehydrogenation of Propane and Isobutane	1
1.3 Comparison of Dehydrogenation with ODH of Propane and Isobutane ..	2
1.3.1 Comparison of Dehydrogenation with ODH of Propane	2
1.3.2 Comparison of Dehydrogenation with ODH of Isobutane	4
1.4 Introduction of Catalysts for ODH of Propane and Isobutane	5
1.4.1 Introduction of Catalysts for ODH of Propane	5
(1) Low-Temperature Catalytic Nanosized Oxide Catalytic System	5
(2) Salts of Heteropoly Compound Catalytic System	5
(3) Vanadium-Containing Catalytic System	6
(4) Molybdenum-Containing Catalytic System	6
(5) Nickel-Containing Catalytic System	7
(6) Other Metal-Containing Catalytic System	7
1.4.2 Introduction of Catalysts for ODH of Isobutane	7
1.5 Mechanism of ODH of Propane and Isobutane	8
1.6 Introduction of Heteropoly Compound	10
1.6.1 Structure of Heteropoly Compound	12
1.6.2 Thermostabilization of Heteropoly Compound	13
1.7 The Objectives of this Thesis	13
1.8 The Outline of this Thesis	14
References	15

Chapter 2 Experimental

2.1 Materials and Reagents	22
2.2 Preparation of Catalysts	23
2.2.1 Synthesis of Keggin-type $\text{H}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$	23
2.2.2 Synthesis of Cs salts of Keggin-type $\text{H}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$	23
2.2.3 Synthesis of NiO-CsPOM Composite Catalysts	24
(1) Citric Acid Coordination Method.....	24
(2) Grinding Method	24
2.3 Evaluation of Catalytic Properties	25
2.3.1 The Catalytic Reaction	25
2.3.2 Calculation Method	25
(1) Calculation Method of Propane	25
(2) Calculation Method of Isobutane	26
2.4 Characterization of Catalysts	29
2.4.1 XRD Characterizations.....	29
2.4.2 N_2 Physical Adsorption.....	29
2.4.3 SEM Characterizations	29
2.4.4 EDS Characterizations.....	29
2.4.5 TEM Characterizations.....	29
2.4.6 IR Characterizations	30
2.4.7 NH_3 -TPD and O_2 -TPD Characterizations	31
2.4.8 XPS Characterizations.....	31
2.4.9 H_2 -TPR Characterizations	31
2.4.10 Raman Characterizations	32
References	32

Chapter 3 ODH of Propane and Isobutane over NiO-CsPOM

Nanocomposite Catalysts

3.1 Introduction	33
3.2 Results and Discussion	33
3.2.1 The Results of the Catalysts Exploration for ODH of Propane	33
(1) Catalytic Performance over Heteropoly Compound	34
I The Effects of Cs Content	34
II The Effects of Little Metal Cations	35
(2) Catalytic Performance over Composite MO and Heteropoly Compound	35
I The Effects of Different Metal Oxide	35
II The Effects of NiO Content	37
III The Effects of Cs Content over 80%NiO-Cs _n POM Composite	38
(3) The Effects of Different Alkali Metals or Alkaline-Earth Metals	39
(4) The Effects of Synthetic Methods and Source of Molybdenum	41
I The Effects of Synthetic Methods	41
II The Effects of Source of Molybdenum	43
(5) The Effects of Reaction Conditions	45
I The Effects of Temperatures over 80%NiO-CsPOM Catalyst	45
II The Effects of $P(C_3H_8)$ over 80%NiO-CsPOM Catalyst	45
III The Effects of $P(O_2)$ over 80%NiO-CsPOM Catalyst	46
IV The Effects of Reaction Conditions over 80%NiO-KPOM	47
(6) Catalyst Life Performance	48
3.2.2 The Results of the Catalysts Exploration for ODH of Isobutane	49
(1) The Effects of NiO Content in NiO-CsPOM for ODH of Isobutane	49
(2) The Effects of Reaction Conditions over 70%NiO-CsPOM Catalyst	50
I The Effects of Temperatures	50
II The Effects of $P(O_2)$	51
(3) 70%NiO-CsPOM Catalyst Life Performance	51
(4) The Effects of NiO Content in NiO-KPOM for ODH of Isobutane	52
3.3 Conclusions	53
References	54

Chapter 4 Characterizations of NiO-CsPOM Catalysts and Its Structure-Reactivity Relationships

4.1 Introduction	56
4.2 Results and Discussion	56
4.2.1 XRD	56
(1) The XRD Characterization of NiO-CsPOM Catalysts	58
(2) XRD Comparison between Fresh and after Reaction NiO-CsPOM Catalysts	59
4.2.2 N ₂ Physical Adsorption	60
4.2.3 SEM	61
4.2.4 EDS	64
4.2.5 TEM	66
4.2.6 NH ₃ -Preadsorption IR	76
4.2.7 NH ₃ -TPD	82
4.2.8 O ₂ -TPD	86
4.2.9 XPS	90
4.2.10 H ₂ -TPR	97
4.2.11 Raman	98
4.8 Conclusions	99
References	100
Chapter 5 General Conclusions	102
List of Publication	105
ACKNOWLEDGEMENTS	106

摘 要

本学位论文针对丙烷和异丁烷氧化脱氢催化反应，详细研究了 NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂的催化性能及结构特征，探究了催化活性中心的本质。

研究发现，NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂在丙烷和异丁烷氧化脱氢催化反应表现了优异的催化性能。改变多种催化剂的制备影响因素（NiO 含量、Cs 含量、碱金属或碱土金属离子的种类、钼源种类、合成方法）和反应条件对该催化体系进行优化实验表明，在丙烷氧化脱氢反应中，80%NiO-CsPOM 和 80%NiO-KPOM 催化剂上得到丙烯的最佳收率。其中 80%NiO-CsPOM 催化剂上在 450 °C 时丙烷转化率为 44%，生成的丙烯选择性为 45%，丙烯收率达到 20%。80%NiO-KPOM 催化剂上 450 °C 丙烷转化率为 42%，生成的丙烯选择性为 50%，丙烯收率达到 21%。这个收率是目前报道的丙烷氧化脱氢反应在 450 °C 时的最高值。在异丁烷氧化脱氢反应中，70%NiO-CsPOM 催化剂上得到异丁烯的最高收率，在 550 °C 异丁烷转化率为 31%，生成的异丁烯选择性为 59%，生成的甲基丙烯醛的选择性为 6.3%，异丁烯收率达到 18%。

针对 NiO-CsPOM 系列纳米催化剂采用 XRD、N₂物理吸附、SEM、TEM、NH₃-IR、NH₃-TPD、O₂-TPD、H₂-TPR、Raman 等方法进行了详细表征，XRD、SEM 与 TEM 研究结果显示相比于纯 NiO (26 nm) 和 Cs_{2.5}H_{0.5}PMo₁₂O₄₀，70~85%wt NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂具有明显小的粒径 (7 nm)，因此具有较大的比表面积 (110-130 m² g⁻¹)。NiO-CsPOM 纳米复合物系列催化剂能在较高温度 (550 °C) 下保持较好的纳米颗粒结构。NH₃-IR 与 NH₃-TPD 研究表明在 NiO 含量为 70~85%wt 的 NiO-CsPOM 纳米复合物催化剂上 L 酸性位数量多，说明这些催化剂上存在较多配位不饱和的金属阳离子，这些配位不饱和的阳离子可能是活化氧气或烷烃的活性位。O₂-TPD 上显示在 NiO 含量为 70~85%wt 的 NiO-CsPOM 纳米复合物催化剂上有较多数量的吸附氧物种，这些吸附氧物种可能归属于 O₂⁻，β O⁻ 和 γ O⁻。丙烷转化生成丙烯的转化活性和 O⁻ 数量存在比较好的线性关系，即丙烯生成选择性相对较高的范围内 (>40%)，O⁻ 数量正比于丙烷转化率。由此我们推断 O⁻ 可能是丙烷氧化脱氢制丙烯的活性氧物种。

关键词：氧化镍；磷钼杂多酸盐；纳米；丙烷；异丁烷；氧化脱氢；丙烯；异丁烯

Abstract

This dissertation focused on developing a kind of novel nano composite material composed by NiO and cesium salt of molybdophosphate (denoted as NiO-CsPOM), which showed efficient catalyst performance for the oxidative dehydrogenation (ODH) of propane and isobutane. The detailed characterizations for the NiO-CsPOM nano composite were carried out, and the correlation between the structure characters of composite materials and their catalytic performance for ODH was studied. The nature of the active site over NiO-CsPOM composite catalyst was discussed.

The catalytic performances for ODH over NiO-CsPOM composite catalysts were influenced by the catalyst composition including NiO content, Cs content, the nature of the alkali cations or alkaline-earth cations instead of Cs^+ , and it also influenced by molybdenum precursor and preparation method. The best catalytic performances for ODH of C_3H_8 were found over 80% NiO-CsPOM catalyst and 80% NiO-KPOM catalyst. For example, over 80% NiO-CsPOM catalyst at 450 °C, 44% C_3H_8 was converted while C_3H_6 formed with the selectivity of 45%, and the yield of C_3H_6 was 20%. Over 80% NiO-KPOM catalyst, C_3H_6 yield of 21% would achieved with selectivity of 50% at 450 °C. This result was much better than those over other catalyst reported so far for the ODH of C_3H_8 at 450 °C. For the ODH of iso- C_4H_{10} reaction over 70% NiO-CsPOM catalyst, 31% iso- C_4H_{10} converted at 550 °C, and produced isobutene and metharolein with the selectivity of 59% and 6.3%. The yield of isobutene reached 18%.

Structures and properties of NiO-CsPOM nano composite materials were characterized detailedly by using XRD, N_2 adsorption, SEM, TEM, NH_3 -IR, NH_3 -TPD, O_2 -TPD, H_2 -TPR and Raman methods. Compared with pure NiO (26 nm) and $\text{Cs}_{2.5}\text{H}_{0.5}\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$, 70-85% NiO-CsPOM nano composite possessed marked smaller particle size around 7 nm, hence had large surface area of 110-130 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$. The nano particle structure of NiO-CsPOM catalyst was stable at the temperature below 550 °C. From NH_3 -TPD and NH_3 -IR studies, large quantity of Lewis acid sites were confirmed over 70%-85% NiO-CsPOM composite samples. These Lewis acid sites possibly arose from the coordinatively unsaturated metal cations created by the composition between NiO and $\text{Cs}_{2.5}\text{H}_{0.5}\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$. From O_2 -TPD results, it was found that the quantity of oxygen adsorption increased, more importantly the stability of the oxygen species was enhanced over NiO-CsPOM composite samples. The coordinatively unsaturated metal cations sites promoted oxygen adsorption as well as their stability likely. The desorption oxygen species could be attributed to O_2^- , βO^- and γO^- . Under the conditions of maintaining the C_3H_6 selectivity higher than 40%, the conversion of propane increased linearly with the increase in the quantity of O^- species. We speculate that the O^- specie is very important for the oxidative dehydrogenation from C_3H_8 to C_3H_6 .

Keywords: Oxidative dehydrogenation; Propane; Isobutane; NiO; Heteropoly compound; Nano composite.

第一章 绪论

1.1 低碳烷烃选择氧化反应概况

我国是天然气和煤层气资源比较丰富的国家,天然气可开采资源量达16万亿立方米(折合原油约160亿吨),煤层气储量也与此相当。然而,已探明的2.1万亿立方米可开采储量大都分布在能源需求量相对较少的中、西部地区,除经长途输送用作城市燃气和少量用作合成氨生产原料外,如何进一步高效利用这些气态碳氢资源已成为制约我国能源工业发展的重要环节。

众所周知,天然气和石油气中主要含 C_1-C_4 等低碳烷烃,主要作为普通燃气,长期以来未能得到有效利用。低碳烷烃功能化是一个可以带来较高经济效益的研究领域,如何将价格低廉的烷烃转化为烯烃、醛、酮、酸等附加值较高的化工产品或中间品是非常具有挑战意义的课题。然而到目前为止只有少数几个低碳烷烃的转化过程实现了工业化,例如丁烷选择氧化生产马来酸、乙烷蒸汽裂解制乙烯、异丁烷脱氢^[1]。

1.2 丙烷与异丁烷氧化脱氢制丙烯与异丁烯的意义

低碳烷烃中的丙烷和异丁烷是油田气、天然气及炼厂气的主要成分,资源丰富,但长期以来未能得到有效利用,主要作为普通燃气。就丙烷而言,它的功能化主要有以下反应:直接脱氢制丙烯、氧化脱氢制丙烯、选择氧化制丙烯醛、丙烯酸、异丙醇、丙酮、氨氧化制丙烯腈和脱氢芳构化等。由于相关产物在化学工业中有重要作用,因此开展此方面的研究意义重大。就异丁烷而言,我国异丁烷资源丰富,每年催化裂化石油气中的产量就有约400万吨,还广泛存在于天然气和其他 C_4 馏分中,它的功能化主要有以下反应:直接脱氢制异丁烯、氧化脱氢制异丁烯、选择氧化制甲基丙烯醛及甲基丙烯酸等。

相对于丙烷和异丁烷而言,丙烯和异丁烯则更有价值。丙烯是仅次于乙烯的重要有机石油化工基本原料,主要用于制造聚丙烯,约占丙烯总需求量的70%。按照消费量排序,丙烯还用于制造丙烯腈、苯酚、丁辛醇、环氧丙烷和丙烯酸等重要化工产品,还可用作生产高辛烷汽油的原料。异丁烯是目前我国稀缺资源之

一，是生产聚异丁烯(PIB)、MTBE、低碳烯烃烷基化、混合低碳烯烃(轻汽油)、丁基橡胶及有机玻璃等化学品的重要原料。

从2002年到2010年，丙烯和异丁烯的衍生物需求将保持5%的高速增长^[2]。由于丙烯需求量的大增，使得由丙烷脱氢制丙烯的技术得到诸如环球油品公司(UOP)、ABB鲁玛斯、伍德等一些大公司的重视和发展^[3]。以异丁烯为资源的精细化工工业发展迅速，异丁烯需求增长很快。

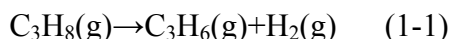
近年来由于丙烯与异丁烯下游产品的快速发展，我国的丙烯与异丁烯需求量迅猛增长，根据中国投资咨询网发布的2007~2008年中国丙烯和异丁烯行业分析及投资咨询报告预测，目前至未来10年，中国的丙烯与异丁烯消费量大于丙烯与异丁烯的供应量，丙烯与异丁烯供需矛盾十分突出。由此可见我国的丙烯与异丁烯需求缺口很大，研究丙烷生产丙烯及相关衍生物意义重大，而丙烷与异丁烷氧化脱氢是一条合理的丙烯与异丁烯制备途径。

1.3 丙烷和异丁烷脱氢与氧化脱氢制丙烯和异丁烯的反应途径对比

1.3.1 丙烷脱氢与氧化脱氢制丙烯的反应途径对比

由于丙烷是一种化学性质不活泼的气体，其脱氢反应所需要的反应温度较高，其工艺是在650℃，通过催化脱氢使丙烷转化为丙烯，这项技术源于异丁烷脱氢制异丁烯工艺^[3]。全球有7个工业化丙烷脱氢装置，其中6个采用UOP的C₃轻烃催化脱氢连续(Oxeflex)移动床工艺，另外一个采用ABB鲁玛斯的Catofin循环多反应器系统工艺。还有其他一些市场化工艺如伍德的ATAR工艺以及斯纳姆普洛盖提(Snamprogetti)和林德的技术。伍德公司最近对工艺做了改进，在第二个反应器中加入氧气，将其变成“氧化脱氢”技术，他们加入氧气可以选择性转化反应器中产生的氢，使反应器中生成丙烯的条件更好。也就是说，丙烷的选择氧化(氧化脱氢)一定程度上比直接脱氢更有优势。

对于丙烷脱氢反应：



热力学的计算结果显示只有当反应温度高于660℃时，其 ΔG 才为负值，此时的 ΔH 为130.6KJ/mol，是一个吸热反应。

其热力学数据见表1-1:

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库